

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.90146

微生物亚硝化抑制剂对风干肠 风味物质形成的影响

Effect of microbial nitrosation inhibitors on the formation
of flavor substances in air-dried sausage

陈援援 马凯华 张雨婷

CHEN Yuan-yuan MA Kai-hua ZHANG Yu-ting

郑翔飞 张新渝 马丽珍

ZHENG Xiang-fei ZHANG Xin-yu MA Li-zhen

(天津农学院食品科学与生物工程学院, 天津 300384)

(College of Food Science and Biotechnology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

摘要:目的:研究微生物亚硝化抑制剂(MNI)对风干肠风味物质形成及变化的影响。方法:通过 4 种不同处理方法制作风干肠:添加 MNI(MNI 组)、添加 MNI 并接入 PRO-MIX5 商业发酵剂(木糖葡萄糖球菌、清酒乳杆菌、类植物乳杆菌)(MNIP 组)、发酵牛骨调味基料和复配抗氧化剂(FBFA)并接入 PRO-MIX5(FBFAP 组)及空白对照组(CK)(CK 组),并测定各风干肠成品的氨基酸组成及风味。结果:谷氨酸、丙氨酸、牛磺酸和肌肽是 4 组风干肠中的主要游离氨基酸,加入 MNIP 能促进风干肠鲜味氨基酸的生成和提高游离氨基酸总量,谷氨酸和丙氨酸这两种呈鲜味和甜味的氨基酸对风干肠的滋味贡献最大,4 组风干肠主要呈鲜甜味。4 组风干肠在风味和滋味上存在差异,电子鼻和电子舌 PCA 分析能将其区分开,其中 MNI 组和 MNIP 组的风味特征和滋味相似,FBFAP 组与 CK 组的滋味比较接近。加入 MNI 和 MNIP 能提高风干肠的鲜味,降低咸味和苦味。正己酸乙酯和异戊酸乙酯是 MNIP 组的特征风味物质,芳樟醇是 MNI 组的特征风味物质,癸醛和异戊酸乙酯是 FBFAP 组的特征风味物质。结论:单独添加 MNI 或 MNI 与 PRO-MIX5 协同作用均能促进风干肠风味的形成。

关键词:风干肠;微生物亚硝化抑制剂;电子鼻;电子舌;游离氨基酸;风味物质

Abstract: **Objective:** To study the effects of microbial nitrification inhibitors on the formation and changes of flavors in air-dried sausages. **Methods:** Four groups of air-dried sausages were designed: MNI group: 0.05% of microbial nitrosation inhibitors (MNI) were added; MNIP group: 0.05% MNI and an inoculation of PRO-MIX5 commercial starter (*Staphylococcus xylose*, *Lactobacillus sake*, and *L. plantarum*) were added; FBFAP group: fermented beef flavorings and compound antioxidants were added, and the sausages were inoculated with the PRO-MIX5 commercial starter; and CK group: blank control (CK). The flavor of air-dried sausages was determined by an amino acid analyzer, Heracles iii ultra-fast gas phase electronic nose, electronic tongue and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). **Results:** Glutamate, alanine, taurine and carnosine are the primary free amino acids in the four groups of air-dried sausages. The addition of MNIP promoted the production of fresh amino acids and increased the total amount of free amino acids. Glutamate and alanine, two umami and sweet amino acids, contributed the most to the taste of air-dried sausages, and the four groups of air-dried sausages were primarily umami and sweet. There were differences in flavor and taste among the four groups. The electronic nose and electronic tongue principal component analysis (PCA) could distinguish between them. The flavors and taste of the MNI and MNIP groups were similar, and the taste of FBFAP group and CK were similar. The addition of MNI and MNIP improved the umami of air-dried sausage and reduced its saltiness and bitterness. Ethyl hexanoate and ethyl isovalerate were the characteristic flavors of the MNIP group. Linalool was the characteristic flavor of the MNI group, while decanal and ethyl isovalerate were the characteristic flavors of the FBFAP group.

基金项目:“十三五”国家重点研发计划重点专项(编号:2016YFD0401500)

作者简介:陈援援,女,天津农学院硕士研究生。

通信作者:马丽珍(1963—),女,天津农学院教授,博士。

E-mail: malizhen-6329@163.com

收稿日期:2021-10-18

Conclusion: The addition of MNI alone or the synergistic effect of MNI and PRO-MIX5 promotes the formation of flavor in the air-dried sausages, indicating that MNI shows great promise at promoting the formation of flavor in air-dried sausages.

Keywords: air-dried sausage; microbial nitrosation inhibitors; electronic nose; electronic tongue; free amino acids; flavors

风干肠是一种天然发酵香肠,以其独特的风味、色泽和质地而闻名于中国东北地区。传统的风干肠主要依靠内源酶和存在于原料中的“野生”微生物起作用,这些“野生”微生物主要包括革兰氏阴性菌、氧化酶阳性菌、需氧菌和少量革兰氏阳性菌^[1]。当生长环境适宜时,这些革兰氏阳性菌,如乳酸菌和葡萄球菌,可能成为优势菌群^[1-2]。因此,对天然菌群的依赖会导致风干肠品质不一^[3]。为了使生产过程标准化,一些发酵剂被用于缩短发酵时间,提高产品质量,并保持最终发酵产品的独特风味^[4]。近年来,有关接种微生物发酵以改善产品风味,确保食品安全的研究较多^[5],但对其发酵机理和风味化合物形成的研究还需深入。Lu 等^[6]研究了不同发酵温度下酸肉菌群与代谢产物的关系,己醛、苯甲醛、壬醛、(E, E)-2,4-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇和辛醛被确定为酸肉中乳酸杆菌产生的挥发性有机化合物,为风味的主要来源。Hongthong 等^[7]研究了接种植物乳杆菌对 Isan 香肠品质的影响,发现接种 10^7 CFU/g 植物乳杆菌后的样品在感官评价上具有更高的硬度和更强烈的风味,并提高了香肠的亮度值。Bao 等^[8]研究发现,接种混合发酵剂乳酸乳球菌和塞氏魏斯氏乳酸菌能改善臭鳊鱼的品质、促进风味的形成和缩短发酵时间。发酵肉制品中产生风味的主要途径有蛋白质降解、脂质氧化、美拉德反应和微生物 4 种^[9]。蛋白质降解过程中产生的氨基酸代谢产物占总挥发性化合物的 6%^[10],在风味形成中起着重要作用。氨基酸可以通过微生物转氨酶转化为酮酸,作为重要的中间体, α -酮酸可以直接间接代谢成相应的醛类化合物。此外,醛可以被醇脱氢酶和醛脱氢酶转化为相应的醇和羧酸^[11]。Chen 等^[12]研究发现,接种混合发酵剂组风干肠氨基酸代谢产生的化合物水平高于对照组($P < 0.05$),可以促进乙基酯的形成,改善发酵风味。因此,乳酸菌发酵有助于形成复杂的风味成分,如氨基酸、维生素和有机酸,这些成分改善了产品的风味、滋味和其他特性^[13]。

实验室^[14]前期筛选得到的 PRO-MIX5(木糖葡萄糖球菌、清酒乳杆菌、类植物乳杆菌)能够有效抑制红肠和风干肠中 *N*-亚硝胺(NAs)的形成,其抑制机理主要是其菌体碎片即微生物亚硝化抑制剂(MNI)的作用,且 0.05% 的 MNI 对红肠和培根中的 NAs 有较好的抑制效果,并能提高产品的感官品质。目前,关于 MNI 在风干肠中的应用尤其是 MNI 与混合发酵剂协同作用对风干肠风味方

面的研究尚未见报道。研究拟对风干肠的工艺参数进行调整,提高发酵温度为 30 ℃,降低风干成熟过程的温度(14~16 ℃);将前期优选出的能提高风干肠安全品质的 PRO-MIX 发酵剂、发酵牛骨调味基料和复配抗氧化剂(FBFA)以及 MNI 应用于风干肠加工中,探讨 3 种抑制剂尤其是 MNI 对风干肠成品风味物质形成的影响,旨在为 MNI 在风干肠中的开发应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冷却排酸成熟 24 h 的猪后腿肉、猪肥膘:天津二商迎宾肉类食品有限公司;

食盐、白沙糖、曲酒、味精、酱油:市售;

茶多酚、迷迭香:豫中生物科技有限公司;

维生素 E、异抗坏血酸钠:苏州佰亿鑫生物科技有限公司;

PRO-MIX5 复合商业发酵剂(木糖葡萄糖球菌、清酒乳杆菌、类植物乳杆菌):活菌数 10^{11} CFU/g,封装于无菌玻璃瓶中冻藏(-20 ℃),意大利萨科公司;

人工胶原蛋白肠衣:牛二层皮提取、孔径 30 mm,神冠控股(集团)有限公司;

2-甲基 3-庚酮:分析纯,美国 Supelco 公司;

气相色谱—质谱联用仪:GCMS-QP2010Plus 型,日本岛津公司;

超快速气相电子鼻:HeraclesII 型,法国 Alpha M.O. S 公司;

电子舌:TS-5000Z 型,日本 INSENT 公司;

氨基酸分析仪:S-43000 型,德国 Sykam 公司;

恒温恒湿箱:CLIMACELL 型,艾力特国际贸易有限公司;

真空搅拌机:BVBj-30F 型,浙江嘉兴艾博实业有限公司。

1.2 方法

1.2.1 FBFA 制备 参照樊晓盼等^[15]的方法制备 FBFA,复合抗氧化剂(CA)添加量:茶多酚、迷迭香、 V_E 和抗坏血酸钠添加量 60.14,60.11,60.00,60.00 mg/kg^[16]。

1.2.2 MNI 制备 参照李秀明等^[17]的方法。

1.2.3 风干肠制作流程

原料肉→预处理→腌制→拌馅→灌肠→风干成熟→成品

操作要点:

(1) 腌制:将猪后腿肉剔除筋膜、脂肪,切成 8 cm×5 cm×3 cm 的方块,用绞肉机搅碎(筛板孔径 8 mm),放入真空搅拌机中,加入占肉总质量(风干肠肥瘦质量比 1:9)1.8%的食盐、0.01%的亚硝酸钠(预先用少量水溶解)和抗坏血酸钠 0.55 g/kg,真空搅拌 5 min,取出后放入

不锈钢盆中,紧贴肉表面盖一层保鲜膜,4℃腌制24 h。

(2) 拌馅:将腌制好的肉倒入真空搅拌机中,依次加入4%糖、1.5%曲酒、0.2%味精、0.3%生抽、10%水、真空搅拌8 min。

(3) 灌肠:将制好的肉馅灌入胶原蛋白肠衣中,结扎(每节13~15 cm)、排气。

(4) 发酵:将罐制好的肉馅于30℃,RH 90%,风速100%的恒温恒湿培养箱中进行发酵,使其pH降至接近5.4后,终止发酵。

(5) 成熟:按表1调节恒温恒湿培养箱的温度、RH和风速。

表1 风干肠工艺参数

Table 1 Process parameters of air-dried sausage

加工时间	温度/℃	RH/%	风速/%
腌制	4	/	/
发酵	30	90	100
成熟第1天	14~16	78	90
成熟第2天	14~16	76	90
成熟第3天	14~16	74	90
成熟第4~7天	14~16	72	80
成熟第8~9天	14~16	75	70
成熟第10~11天	14~16	80	70
成熟第12天	14~16	85	60
成熟第13天	14~16	80	60
成熟第14~15天	14~16	75	70
成熟第16~20天	14~16	80	60

1.2.4 试验设计方案

(1) CK组:按风干肠的基础配方和工艺制作。

(2) MNI组:按风干肠的基础配方和工艺制作,按肉重的0.05%加入由PRO-MIX5制备的菌体碎片(微生物亚硝化抑制剂,MNI)。

(3) MNIP组:按风干肠的基础配方和工艺制作,按肉重的0.05%加入MNI,接入20 g/100 kg的PRO-MIX5商业复合菌(木糖葡萄球菌、清酒乳杆菌、类植物乳杆菌)。

(4) FBFAP组:按风干肠的基础配方和工艺制作,按肉重的2%加入FBF和CA,接入20 g/100 kg的PRO-MIX5商业复合菌(糖葡萄球菌、清酒乳杆菌、类植物乳杆菌)。

1.2.5 指标测定

(1) 游离氨基酸含量:参照牛树彬等^[18]的方法,按式(1)计算单个游离氨基酸的滋味强度值(TAV)。

$$T_{AV} = \frac{C_1}{C_2}, \quad (1)$$

式中:

T_{AV} ——滋味强度值;

C_1 ——呈味化合物含量,mg/100 g;

C_2 ——呈味化合物的滋味阈值,mg/100 g。

(2) HeraclesII超快速电子鼻分析:参照陈援援等^[19]的方法。

(3) 电子舌分析:参照陈援援等^[19]的方法。

(4) 挥发性风味物质(GC-MS)检测:参照雷虹^[20]的方法。

(5) 气味活度值(OAV)计算:参照张凯华等^[21]的方法。

1.3 数据处理

采用Excel 2010软件计算平均值和标准差,用SPSS 19.0软件进行显著性分析,Origin 2018软件作图。显著性水平 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 风干肠成品挥发性风味物质PCA分析

由图1可知,主成分1和主成分2的方差贡献率分别为94.127%,4.495%,累计方差贡献率为98.622%,表明这两个主成分足以代表样品的大部分信息。4组风干肠成品之间不存在交叉和重合,说明CK、MNI、MNIP和FBFAP组风干肠中挥发性成分的种类和含量存在差异。其中MNI组和MNIP组之间的相对距离较近,说明两组样品之间存在相同的挥发性风味物质,可能是两者的特征挥发性风味物质比较突出所以将两者区分开来。

2.2 风干肠的有效味觉

由图2可知,主成分1和主成分2的方差贡献率分别为98.873%,0.921%,累积方差贡献率为99.794%。4组风干肠成品在味觉上存在一定差异,但MNI组和MNIP组在8个味觉指标上比较接近,FBFAP组和CK组的比较接近。酸味的无味点为-13,苦味回味、涩味回味和丰富性的无味点为0,4组风干肠成品的酸味、苦味回味、涩

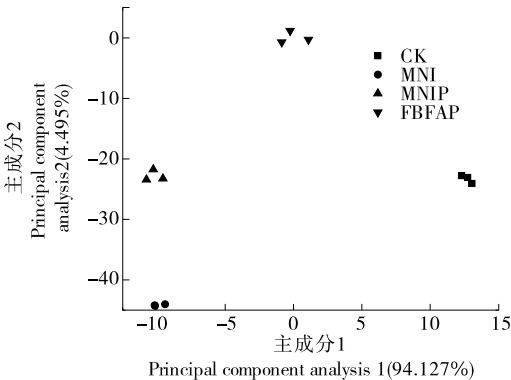


图1 基于气相电子鼻检测风干肠成品挥发性风味物质的PCA分析
Figure 1 PCA analysis of volatile flavor substances in air-dried sausage products based on gas phase electronic nose detection

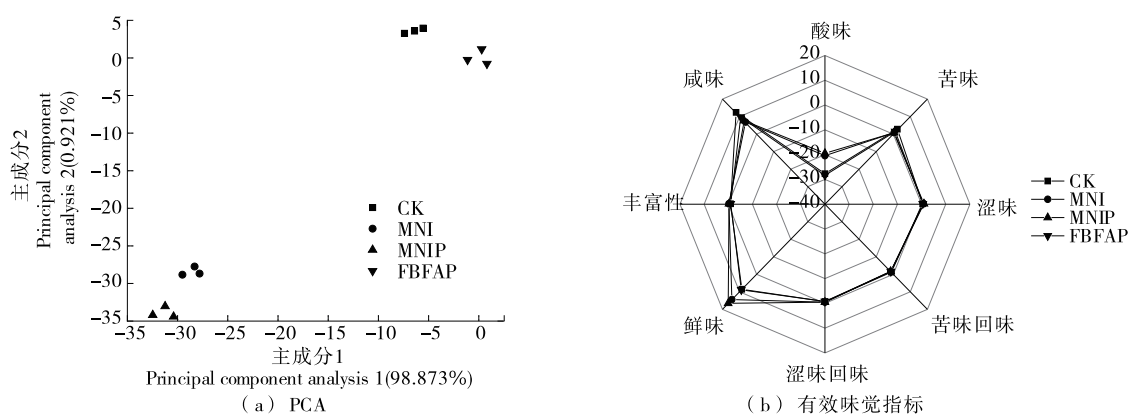


Figure 2 PCA and effective taste index analysis of air-dried sausage based on electronic tongue

味回味和丰富性在传感器上的响应值低于无味点,说明 4 组样品在这 4 个味觉指标的滋味特征不明显;咸味的无味点为 -6,苦味、涩味和鲜味的无味点为 0,4 组样品的苦味、涩味、鲜味和咸味在传感器上的响应值大于无味点,说明这 4 个味觉指标是 4 组风干肠成品有效且重要的味觉指标。MNI 组和 MNIP 组的鲜味响应值最高,苦味和咸味响应值低于 CK 组,说明加入 MNI、MNIP 能降低苦味和咸味,提高风干肠的鲜味。

2.3 风干肠成品的游离氨基酸组成

由表 2 可知,谷氨酸、丙氨酸、牛磺酸和肌肽是 4 组风干肠中的主要游离氨基酸,谷氨酸和天冬氨酸呈鲜味,在 MNI 组和 MNIP 组中的含量显著高于 CK 组和 FBFAP 组,说明加入 MNI 和 MNIP 有利于风干肠鲜味氨基酸的形成。牛磺酸是一种具有显著抗氧化活性的化合物^[22],在 3 个处理组中的含量明显高于 CK 组 ($P < 0.05$)。甜味氨基酸总量在 FBFAP 组中最高,苦味氨基酸总量在 CK 组中最高,说明加入 FBFAP 能改善终产品的甜味、抑制苦味。研究^[23]表明,蛋白质过度水解会给肉制品带来苦味或金属味。4 组风干肠游离氨基酸总量大小为 MNIP 组 > CK 组 > FBFAP 组 > MNI 组,FBFAP 组中的游离氨基酸总量低于 CK 组 ($P < 0.05$),与 Hu 等^[24]的结果不一致,可能是由于产品配方、加工条件和微生物种群不同。4 组风干肠游离氨基酸总量不同,是因为肌肉和细菌来源的酶活性受加工参数的影响,如温度、相对湿度、发酵时间和 pH 值变化等。在前期试验的基础上改变工艺条件,新增了一个较高温度 30 °C 的发酵阶段,MNI 组和 MNIP 组的产酸速度快,分别在发酵第 15.0、12.5 h 结束发酵,CK 组和 FBFAP 组分别在发酵第 22、21 h 结束发酵,由于发酵时间、肉馅 pH 值和添加物不同,4 组风干肠的游离氨基酸含量有差异,此外,也有可能是游离氨基酸参与风味物质的形成而减少。综上,加入 MNIP 能缩短风干肠的发酵时间,促进风干肠鲜味氨基酸的生成和提高游离氨基酸总量。

2.4 风干肠成品游离氨基酸的味觉特征及 TAV 值

由表 3 可知,4 组风干肠中 TAV 值 > 1 的氨基酸有 4 种,包括谷氨酸、丙氨酸、缬氨酸和组氨酸。谷氨酸的 TAV 值最高,对风干肠滋味贡献度最大。其次是丙氨酸、缬氨酸和组氨酸,丙氨酸为甜味氨基酸,缬氨酸和组氨酸为苦味氨基酸,TAV 较小,对风干肠滋味贡献度较小,所以风干肠主要呈鲜甜味。MNIP 组中谷氨酸的 TAV 值最高,其次是 MNI 组,由于 MNIP 组中对鲜味有贡献的游离氨基酸含量均高于其他 3 组,因此 MNIP 组发酵的风干肠鲜味更强烈,同时说明在接种有发酵剂 PRO-MIX5 时,添加 MNI 促进风干肠中鲜味强度增加的效果优于 FBFA。

2.5 基于 GC-MS 分析风干肠成品挥发性风味物质

由表 4 可知,酯类、醇类、酸类、醛类和杂环化合物类是 4 组风干肠主要的风味成分。MNI、MNIP 和 FBFAP 组中检出的风味物质总量显著高于 CK 组 ($P < 0.05$),主要归因于发酵过程中发生的生化反应,如碳水化合物发酵、氨基酸代谢、蛋白质氧化、脂质自氧化、脂质 β -氧化和酯化等^[25-26]强度不一致。

2.5.1 醛类物质 一般来说,脂质自动氧化会产生醛类物质,由于其低阈值,对风干肠整体风味贡献较大^[9]。4 组风干肠中醛类物质总量大小为 MNI 组 > MNIP 组 > FBFAP 组 > CK 组,说明加入 MNI、MNIP 能促进风干肠中醛类风味物质的形成与积累。4 组样品中均检测到苯甲醛和苯乙醛,主要是由细菌代谢芳香族氨基酸产生^[1]。醛类物质中,正己醛含量最高且在 4 组样品中差异显著 ($P < 0.05$),可能是由于乳酸菌中相关酶的活力不同。反式-2-辛烯醛、正己醛、反式-2,4-壬二烯醛、反式-2,4-庚二烯醛、反-2-癸烯醛、反式-2,4-癸二烯醛、2-十一烯醛、反式-2-庚烯醛和正辛醛是 MNI 组和 MNIP 组的特征醛类物质。线性醛类主要来自不饱和脂肪酸的氧化降解,如油酸、亚油酸、亚麻酸和花生四烯酸^[23],而支链醛的主要

形成途径为氧化脱氨脱羧,可能通过 Strecker 降解产生。

2.5.2 醇类、酮类物质 醇的产生有多种方式,如氨基酸代谢、脂质氧化和甲基酮还原^[27]。乙醇是 4 组风干肠中含量最丰富的化合物,在 MNI 组和 MNIP 组中含量最高,可能与乳酸菌主导的碳水化合物发酵、氨基酸代谢和风干肠制作过程中加入的曲酒有关,Lin 等^[28]研究发现,在乳酸菌的氨基酸代谢过程中,其中一条氨基酸途径与

两种脱氢酶有关,即 α -酮酸脱氢酶和羧基酸脱氢酶,具有抗氧化能力的乳酸菌菌株可以增强氨基酸的降解,并通过还原反应促进醛生成更多的醇。还可能是加入的 MNI 具有一定的抗氧化性,MNI 是 PRO-MIX5 发酵剂的细胞破碎物,该细胞破碎物含有多种生物活性成分,如胞外多糖。研究^[29]发现,乳酸菌是优良的胞外多糖产生菌。植物乳杆菌 c88 胞外多糖具有显著清除活性氧效果,其他植

表 2 风干肠成品的游离氨基酸组成[†]

Table 2 Free amino acid composition of 4 groups of air-dried sausages

氨基酸种类	相对含量/(10 ⁻² mg·g ⁻¹ 湿基)			
	CK	MNI	MNIP	FBFAP
苏氨酸	20.025±0.087 ^b	27.889±0.141 ^d	26.248±0.398 ^c	18.644±0.204 ^a
缬氨酸	54.836±0.113 ^d	42.344±0.126 ^b	41.354±0.145 ^a	51.901±0.086 ^c
蛋氨酸(甲硫氨酸)	23.088±0.049 ^d	15.917±0.087 ^a	17.424±0.103 ^b	22.650±0.151 ^c
异亮氨酸	35.411±0.200 ^d	30.474±0.257 ^b	28.062±0.055 ^a	32.846±0.091 ^c
亮氨酸	73.537±0.206 ^c	69.682±0.158 ^b	67.172±0.075 ^a	66.940±0.203 ^a
苯丙氨酸	34.247±0.117 ^c	33.762±0.184 ^b	32.824±0.100 ^a	34.458±0.105 ^c
色氨酸	3.738±0.111 ^a	6.141±0.122 ^d	4.546±0.158 ^b	5.624±0.106 ^c
赖氨酸	35.805±0.173 ^b	38.498±0.155 ^c	45.251±0.128 ^d	27.452±0.231 ^a
天冬氨酸	8.714±0.170 ^b	15.748±0.130 ^d	14.899±0.090 ^c	7.364±0.060 ^a
丝氨酸	13.610±0.080 ^d	10.777±0.210 ^b	12.860±0.100 ^c	10.343±0.090 ^a
谷氨酸	388.204±0.168 ^b	404.464±0.319 ^c	464.728±0.398 ^d	382.389±0.257 ^a
甘氨酸	60.087±0.071 ^c	44.139±0.121 ^a	45.261±0.091 ^b	66.381±0.115 ^d
丙氨酸	180.358±0.156 ^d	134.385±0.180 ^b	127.495±0.169 ^a	177.255±0.130 ^c
酪氨酸	0.840±0.070 ^a	5.095±0.090 ^c	3.464±0.055 ^b	0.845±0.031 ^a
组氨酸	23.008±0.085 ^c	17.734±0.110 ^a	25.925±0.100 ^d	19.747±0.117 ^b
精氨酸	3.294±0.176 ^b	12.823±0.139 ^d	11.922±0.151 ^c	2.924±0.065 ^a
脯氨酸	9.769±0.195 ^a	28.907±0.176 ^c	30.640±0.210 ^d	26.447±0.230 ^b
磷酸丝氨酸	12.034±0.016 ^a	13.553±0.034 ^c	12.091±0.08 ^b	12.058±0.010 ^{ab}
牛磺酸	109.792±0.068 ^a	116.732±0.084 ^d	112.151±0.096 ^c	110.243±0.093 ^b
磷乙醇胺	0.055±0.005 ^a	0.181±0.010 ^b	0.088±0.013 ^a	0.440±0.027 ^c
尿素	0.919±0.088 ^a	11.066±0.055 ^d	5.248±0.045 ^b	7.867±0.125 ^c
β 丙氨酸	17.734±0.106 ^d	7.698±0.170 ^a	12.900±0.085 ^c	11.605±0.145 ^b
β 氨基异丁酸	0.007±0.002 ^d	0.063±0.016 ^a	0.359±0.060 ^c	0.175±0.025 ^b
γ 氨基丁酸	33.742±0.142 ^d	5.057±0.165 ^a	20.103±0.055 ^c	14.872±0.135 ^b
肌肽	881.748±0.237 ^c	744.453±0.200 ^a	904.010±0.165 ^d	806.061±0.181 ^b
鸟氨酸	3.936±0.075 ^b	1.264±0.055 ^a	4.035±0.085 ^b	3.907±0.091 ^b
必需氨基酸总量	280.690±1.010 ^c	264.710±1.230 ^b	262.880±1.030 ^b	260.520±1.170 ^a
非必需氨基酸总量	687.880±0.650 ^b	674.070±0.860 ^a	737.190±1.150 ^d	693.690±1.080 ^c
非蛋白氨基酸	1 060.000±0.470 ^c	900.060±0.300 ^a	1 070.990±0.160 ^d	967.230±0.440 ^b
总量	2 028.570±2.120 ^c	1 838.840±2.380 ^a	2 071.060±2.290 ^d	1 921.440±2.690 ^b
鲜味成分	396.918±0.040 ^b	420.213±0.194 ^c	479.628±0.481 ^d	389.753±0.316 ^a
甜味成分	283.850±0.575 ^c	246.098±0.819 ^b	242.505±0.743 ^a	299.069±0.761 ^d
苦味成分	287.804±1.086 ^d	272.470±1.424 ^b	277.944±0.936 ^c	265.387±1.180 ^a

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 3 风干肠成品游离氨基酸的味觉特征及 TAV 值

Table 3 Taste characteristics and TAV values of free amino acids in 4 groups of air-dried sausages

味道特征	氨基酸	阈值/ (10 ⁻² mg · g ⁻¹)	TAV 值			
			CK	MNI	MNIP	FBFAP
鲜味(+)	天冬氨酸	100	0.09	0.16	0.15	0.07
	谷氨酸	30	12.94	13.48	15.49	12.75
	小计		13.03	13.64	15.64	12.82
甜味(+)	苏氨酸	260	0.08	0.11	0.10	0.07
	丝氨酸	150	0.09	0.07	0.09	0.07
	甘氨酸	130	0.46	0.34	0.35	0.51
	丙氨酸	60	3.01	2.24	2.12	2.95
	脯氨酸	300	0.03	0.10	0.10	0.09
	小计		3.67	2.85	2.76	3.69
	缬氨酸	40	1.37	1.06	1.03	1.30
	蛋氨酸	30	0.77	0.53	0.58	0.76
	异亮氨酸	90	0.39	0.34	0.31	0.36
	亮氨酸	190	0.39	0.37	0.35	0.35
苦味(-)	苯丙氨酸	90	0.38	0.38	0.36	0.38
	色氨酸	90	0.04	0.07	0.05	0.06
	赖氨酸	50	0.72	0.77	0.91	0.55
	酪氨酸	260	0.00	0.02	0.01	0.00
	组氨酸	20	1.15	0.89	1.30	0.99
	精氨酸	50	0.07	0.26	0.24	0.06
	小计		5.28	4.67	5.15	4.81

物乳杆菌的胞外多糖在高浓度下对 DPPH 自由基和超氧自由基有较强的清除能力^[30-31]。Nehal 等^[32]研究发现,乳酸菌产生的胞外多糖具有抗氧化作用,且抗氧化效率与胞外多糖浓度有关。1-辛烯-3-醇具有蘑菇味和花香,是发酵肉制品中常见的不饱和醇^[33],4 组风干肠中均有检出,其在 MNI 组和 MNIP 组中的相对质量浓度最高。正庚醇、正丁醇可通过风干肠中的乳酸菌和酵母介导的某些氨基酸转化而得^[34]。4 组风干肠中检测到含量较高的 3-羟基-2-丁酮,尤其是在 MNIP 组中最高,丙酮酸可通过一系列代谢反应转化为 2,3-丁二酮,而 2,3-丁二酮将通过各种还原酶转化为 3-羟基-2-丁酮^[35],Chen 等^[12]研究发现接种清酒乳杆菌会增加发酵香肠中 3-羟基-2-丁酮含量。

2.5.3 酸类物质 风干肠发酵成熟过程中产生的有机酸可增强对香气的感知^[36]。4 组风干肠中共鉴定出 16 种酸类物质,其中含量较高有醋酸、正己酸、辛酸、丁酸、4-甲基戊酸、异戊酸、正癸酸、3-己烯酸和异丁酸,醋酸可以由乳酸菌、葡萄球菌的脂肪酸氧化和丙氨酸分解代谢形成,丁酸可能来自于脂质氧化或缬氨酸脱氨^[37]。CK 组中酸类物质总量显著高于其他 3 个处理组($P<0.05$),FBFAP 组次之,MNI 组和 MNIP 组中酸类物质总量差异不显著。

Lin 等^[15]研究表明,乳酸菌代谢产生的醇和有机酸在酯酶和烷基转移酶的作用下生成相应的酯,进而使 MNI、MNIP 和 FBFAP 组中酸类物质含量降低。

2.5.4 酯类物质 酯类是 4 组风干肠中含量最丰富的挥发性风味物质,共检出 40 种酯类。FBFAP 组中酯类物质总量最高,其生成取决于醇和酸的存在情况,以及葡萄球菌的酯化酶活性,特别是通过乙酰辅酶 A 或酰基辅酶 A 与酒精的酯化反应生成的酯,使发酵肉制品具有水果味、甜味和花香的风味^[38]。辛酸乙酯、己酸甲酯、正己酸乙酯、辛酸甲酯、丁酸乙酯和乳酸甲酯是 4 组风干肠中最主要的酯类物质,短链酸形成的酯有水果味,这有助于形成风干肠的特殊风味。具有清酒曲香味和菠萝香味的正己酸乙酯、己酸甲酯和乳酸甲酯在 MNI 组和 MNIP 组中的相对含量最高,丁酸甲酯在 CK 组和 FBFAP 组中的含量较高,在 MNI 组和 MNIP 组中未检出,说明加入的 MNI、MNIP 和 FBFAP 能改变风干肠中酯类物质的含量。

2.5.5 杂环化合物类 肉在发酵过程中会形成杂环类化合物包括吡嗪、呋喃(杏仁味和甜味)、噻唑和吡啶类。美拉德反应产生的 2-甲基吡嗪类物质,即使在较低的浓度水平,也有利于风干肠风味的形成。4 组风干肠中检测出 9 种杂环类化合物,FBFAP 组中的杂环类化合物相对含

表 4 4 组风干肠成品挥发性风味物质相对含量[†]

Table 4 Relative mass concentration of volatile flavor substances in 4 groups of air-dried sausage products

		$\mu\text{g}/\text{kg}$			
化合物名称		CK	MNI	MNIP	FBFAP
醛类	苯甲醛	233.21±0.24 ^d	110.02±1.13 ^a	159.27±1.77 ^b	224.99±2.07 ^c
	苯乙醛	184.36±1.38 ^c	87.13±1.50 ^a	91.18±0.67 ^b	183.36±2.38 ^c
	α -亚乙基-苯乙醛	49.30±0.34 ^c	17.98±1.47 ^a	22.94±0.53 ^b	59.10±1.68 ^d
	十四烷醛	41.66±0.21 ^a	—	—	70.94±0.05 ^b
	4-乙基苯甲醛	22.17±1.70	21.20±0.18	21.04±0.59	—
	反式-2-辛烯醛	15.08±0.44 ^b	144.01±2.68 ^d	138.54±2.10 ^c	2.42±0.04 ^a
	正己醛	1.21±0.04 ^a	703.20±1.01 ^c	508.53±1.25 ^b	0.82±0.02 ^a
	癸醛	1.30±0.26 ^a	9.63±0.09 ^c	8.04±0.11 ^b	20.23±0.21 ^d
	反式-2,4-壬二烯醛	—	13.91±0.74	13.16±0.23	—
	反式-2,4-庚二烯醛	—	16.38±0.53 ^b	14.02±0.33 ^a	—
	反-2-癸烯醛	—	11.30±0.41	11.17±0.15	—
	反式-2,4-癸二烯醛	—	46.44±0.85 ^a	54.02±0.03 ^b	—
	2-十一烯醛	—	52.46±0.23 ^a	54.58±1.19 ^b	—
	反式-2-庚烯醛	—	113.12±1.86 ^b	87.19±2.61 ^a	—
	正辛醛	—	176.44±1.43 ^b	161.89±0.56 ^a	—
	小计	548.29±2.23 ^a	1 523.21±6.47 ^d	1 345.57±2.45 ^c	561.87±2.13 ^b
	乙醇	1 480.82±2.26 ^a	3 019.90±17.10 ^d	2 062.16±15.46 ^c	1 702.03±10.10 ^b
醇类	异戊醇	142.58±1.80 ^d	73.96±0.01 ^a	94.49±2.28 ^b	124.75±2.86 ^c
	苯乙醇	119.89±0.59 ^d	52.05±0.27 ^a	61.32±1.18 ^b	113.71±2.85 ^c
	2,3-丁二醇	104.67±0.61 ^a	—	—	139.95±0.07 ^b
	丙二醇	103.95±0.59 ^b	—	47.09±0.19 ^a	—
	卡必醇	61.74±0.39 ^b	56.07±1.41 ^a	65.96±0.68 ^c	86.49±1.31 ^d
	十四醇	40.26±0.10 ^b	—	—	27.36±0.46 ^a
	1-十六烷醇	40.15±0.11 ^b	28.40±0.45 ^a	41.92±0.62 ^c	39.45±0.21 ^b
	3-苯丙醇	34.31±0.34 ^c	0.71±0.00 ^a	1.08±0.04 ^a	6.40±0.24 ^b
	3-甲基硫基丙醇	31.78±0.63 ^d	5.30±0.25 ^a	9.24±0.05 ^b	26.84±1.18 ^c
	正己醇	30.61±0.91 ^b	38.23±0.81 ^d	34.48±0.06 ^c	14.44±0.29 ^a
	苯甲醇	7.28±0.15 ^c	4.08±0.05 ^b	3.26±0.06 ^a	4.24±0.10 ^b
	正庚醇	5.13±0.31 ^a	81.32±0.49 ^c	53.00±0.61 ^b	—
	1-辛烯-3-醇	2.90±0.09 ^a	197.55±0.73 ^c	159.10±0.80 ^b	3.91±0.06 ^a
	芳樟醇	—	48.31±0.22	—	—
	1-戊醇	—	105.30±1.07 ^b	70.05±0.10 ^a	—
	正丁醇	—	5.21±0.10 ^b	3.38±0.06 ^a	—
	1,4-丁二醇	—	8.75±0.10 ^a	—	18.10±0.00 ^b
	2,6-甲基-4-庚醇	—	158.07±0.30 ^b	114.49±1.20 ^a	—
	乙缩醛二乙醇	—	24.16±0.10 ^a	663.99±3.86 ^b	—
	小计	2 206.08±2.72 ^a	3 907.35±15.16 ^d	3 485.00±15.64 ^c	2 307.68±19.01 ^b
	对丙烯基茴香醚	56.87±2.70 ^c	43.66±0.68 ^b	39.89±0.49 ^a	74.39±1.81 ^d
酮类	小计	56.87±2.70 ^c	43.66±0.68 ^b	39.89±0.49 ^a	74.39±1.81 ^d
	3-羟基-2-丁酮	575.62±0.52 ^a	1 375.09±18.92 ^c	1 618.18±2.89 ^d	1 046.49±4.33 ^b
	1-辛烯-3-酮	—	42.10±0.11	—	—
	小计	575.62±0.52 ^a	1 421.19±19.04 ^c	1618.18±2.89 ^d	1 046.49±4.33 ^b

续表 4

化合物名称		CK	MNI	MNIP	FBFAP
酸类	醋酸	1 328.09±22.55 ^d	887.46±6.98 ^b	847.44±4.65 ^a	1 099.90±10.79 ^c
	正己酸	1 028.61±8.21 ^b	1 126.78±14.89 ^c	1 128.26±10.19 ^c	1 001.33±0.32 ^a
	辛酸	558.72±6.96 ^d	546.42±0.39 ^c	516.45±2.46 ^b	461.15±0.19 ^a
	丁酸	465.05±3.79 ^c	265.93±5.75 ^a	267.70±0.17 ^a	341.38±4.64 ^b
	4-甲基戊酸	259.35±1.72 ^c	10.05±00.09 ^a	11.67±0.31 ^a	45.74±1.45 ^b
	异戊酸	204.90±0.68 ^c	103.53±1.56 ^a	173.38±0.46 ^b	331.00±6.72 ^d
	正癸酸	65.76±3.41 ^a	72.14±0.12 ^b	87.71±1.40 ^c	75.78±1.50 ^b
	3-己烯酸	55.62±0.10 ^d	46.97±0.09 ^a	53.79±0.42 ^c	50.89±0.03 ^b
	异丁酸	44.00±1.52 ^b	24.91±0.27 ^a	25.91±0.06 ^a	46.24±1.31 ^c
	苯甲酸	17.79±0.33 ^d	5.60±0.08 ^b	1.91±0.05 ^a	6.03±0.02 ^c
	壬酸	12.54±0.25 ^c	10.96±0.22 ^b	6.52±0.08 ^a	14.32±1.16 ^d
	十二酸	8.49±0.09 ^c	3.89±0.08 ^b	3.42±0.21 ^a	8.31±0.17 ^c
	9-癸烯酸	6.38±0.12 ^c	5.76±0.15 ^b	6.22±0.01 ^c	3.16±0.15 ^a
	亚油酸	5.39±0.10 ^b	3.54±0.14 ^a	3.44±0.14 ^a	—
	棕榈酸	3.15±0.10 ^b	2.34±0.17 ^a	3.24±0.11 ^b	3.21±0.10 ^b
	戊酸	—	18.02±0.57	—	—
	小计	4 027.18±75.82 ^c	3 134.31±30.07 ^a	3 137.06±9.75 ^a	3 488.45±27.86 ^b
酚类	对-甲酚	38.45±1.30 ^c	3.58±0.36 ^a	3.94±0.06 ^a	35.38±0.43 ^b
	小计	38.45±1.30 ^c	3.58±0.36 ^a	3.94±0.06 ^a	35.38±0.43 ^b
	辛酸乙酯	779.42±2.31 ^d	756.88±8.48 ^c	619.28±9.00 ^b	522.81±0.62 ^a
酯类	己酸甲酯	670.00±0.56 ^a	903.36±2.95 ^c	980.98±3.38 ^d	832.39±3.61 ^b
	丁酸甲酯	659.55±0.57 ^b	—	—	214.02±0.14 ^a
	正己酸乙酯	468.43±0.38 ^a	798.22±1.06 ^c	875.35±1.99 ^d	531.59±0.81 ^b
	辛酸甲酯	466.52±0.67 ^a	851.48±10.38 ^c	638.75±3.05 ^b	958.25±2.30 ^d
	癸酸乙酯	432.06±0.82 ^c	—	380.89±0.65 ^a	404.28±3.69 ^b
	丁酸乙酯	228.28±0.04 ^d	197.02±0.74 ^a	206.20±1.41 ^c	202.11±0.67 ^b
	3-苯丙酸乙酯	209.94±1.64	—	—	—
	异戊酸甲酯	136.34±2.70 ^a	—	150.69±0.18 ^b	292.51±6.03 ^c
	乳酸甲酯	127.37±1.60 ^b	252.52±4.23 ^c	246.28±4.62 ^c	114.28±3.47 ^a
	γ-丁内酯	92.61±0.47 ^b	46.67±1.08 ^a	43.03±0.33 ^a	94.73±1.23 ^b
	苯乙酸乙酯	47.28±0.26 ^c	26.87±0.65 ^a	26.78±0.34 ^a	43.82±0.19 ^b
	庚酸乙酯	42.31±0.46 ^c	25.56±0.46 ^a	30.25±0.19 ^b	50.74±1.01 ^d
	丁酸戊酯	26.63±0.37 ^b	—	—	21.95±0.74 ^a
	苯乙酸甲酯	22.71±0.21 ^c	9.10±0.47 ^b	6.66±0.21 ^a	61.22±0.69 ^d
	醋酸苯乙酯	22.57±0.04 ^b	—	—	19.83±0.44 ^a
	邻苯二甲酸二丁酯	17.21±0.41 ^b	—	7.53±0.16 ^a	—
	丙位壬内酯	16.39±0.50 ^d	7.38±0.06 ^b	6.60±0.17 ^d	15.54±0.23 ^c
	异戊酸乙酯	16.76±0.68 ^b	11.19±0.25 ^a	18.77±0.52 ^c	43.87±0.95 ^d
	十一酸乙酯	14.87±0.22 ^c	4.59±0.13 ^b	3.34±0.07 ^a	16.67±0.40 ^d
	己酸戊酯	14.65±0.34 ^b	—	—	0.32±0.01 ^a
	庚酸甲酯	12.46±0.23	—	—	12.41±0.36
	己酸异戊酯	10.82±0.16 ^a	—	21.12±0.30 ^b	10.65±0.24 ^a
	棕榈酸乙酯	10.03±0.75 ^a	13.46±0.44 ^b	10.46±0.22 ^a	10.28±0.21 ^a

续表 4

化合物名称		CK	MNI	MNIP	FBFAP
酯类	十四酸乙酯	9.43±0.38 ^c	4.67±0.32 ^a	6.14±0.02 ^b	12.22±0.22 ^d
	肉豆蔻酸甲酯	10.40±0.90 ^b	5.64±0.17 ^a	—	23.17±0.23 ^c
	乙酸异戊酯	4.83±0.08 ^b	1.84±0.03 ^a	5.69±0.01 ^c	10.39±0.30 ^d
	亚油酸乙酯	3.47±0.11 ^c	1.81±0.01 ^a	2.57±0.10 ^b	—
	醋酸辛酯	2.00±0.01 ^a	84.96±0.30 ^b	92.35±1.20 ^c	—
	乳酸乙酯	—	515.93±2.78	—	—
	邻苯二甲酸二异丁酯	—	8.46±0.25 ^b	8.03±0.01 ^a	—
	丁位癸内酯	—	10.31±0.29	10.46±0.22	—
	戊酸乙酯	—	4.02±0.01 ^b	2.54±0.04 ^a	—
	丁位壬内酯	—	12.23±0.13 ^a	12.31±0.25 ^a	20.51±0.18 ^b
	顺-9-十四碳烯乙酸酯	—	1.10±0.03	—	—
	3-甲硫基丙酸甲酯	—	0.17±0.01 ^a	0.27±0.01 ^b	0.69±0.02 ^c
	棕榈酸甲酯	—	11.26±0.24 ^a	15.04±0.24 ^b	21.04±1.06 ^c
	2-甲基丁酸乙酯	—	—	36.78±0.08 ^a	54.03±1.87 ^b
	壬酸甲酯	—	—	—	71.47±0.48
烯类	甲酸庚酯	—	—	—	4.14±0.03
	小计	4 575.70±1.08 ^b	4 566.69±29.56 ^b	4 465.15±4.57 ^a	4 721.95±18.62 ^c
	苯乙烯	—	—	—	17.41±0.39
	小计	—	—	—	17.41±0.39
	2,3,5-三甲基吡嗪	91.72±0.74 ^c	14.10±0.03 ^a	37.52±1.88 ^b	266.35±3.47 ^d
	2,6-二甲基吡嗪	56.95±0.80 ^b	—	—	50.72±1.27 ^a
	2-乙酰基-2-噻唑啉	26.27±0.80 ^b	—	—	25.71±0.44 ^a
	苯并噻唑	13.16±0.50 ^b	2.93±0.05 ^a	2.46±0.05 ^a	11.01±2.51 ^b
	2-甲基吡嗪	9.97±0.32 ^a	—	—	13.49±0.22 ^b
	2,3,5,6-四甲基吡嗪	9.42±0.12 ^a	12.87±0.26 ^b	19.37±0.01 ^c	99.36±1.26 ^d
	3-甲基吡啶	—	1.53±0.04 ^b	0.72±0.00 ^a	2.81±0.03 ^c
	吡啶	—	3.11±0.09 ^b	2.57±0.10 ^a	—
	2,5-二甲基吡嗪	—	—	—	30.00±0.46
	小计	207.50±0.17 ^c	34.55±0.33 ^a	62.63±1.91 ^b	501.45±9.67 ^d

† 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

量最高,CK 组次之,MNI 组和 MNIP 组较低。研究^[23]表明,接种菌株或风干肠中的原始微生物对美拉德反应底物(还原糖和氨基酸)的分解代谢可能导致这些化合物的形成或降解,但是关于其形成或降解机制需进一步深入研究。

2.6 风干肠成品挥发性风味物质 OAV 值

由表 5 可知,4 组风干肠中有 13 种挥发性化合物的 OAV>1,分别为 1-辛烯-3-醇、芳樟醇、反式-2-辛烯醛、正己醛、癸醛、反式-2,4-壬二烯醛、正辛醛、辛酸乙酯、正己酸乙酯、癸酸乙酯、丁酸乙酯、庚酸乙酯和异戊酸乙酯,是风干肠发酵气味的主要来源。MNI 组和 MNIP 组的醇类(1-辛烯-3-醇)OAV 值、醛类如反式-2-辛烯醛、正己醛、癸醛、反式-2,4-壬二烯醛和正辛醛的 OAV 值远高于 CK

组,说明加入 MNI 和 MNIP 有利于风干肠中醇类物质和醛类物质的呈味。正己酸乙酯和异戊酸乙酯在 MNIP 组中的 OAV 值最大,对该组风味贡献最大,芳樟醇仅在 MNI 组中检出,且 OAV>1,说明芳樟醇是 MNI 组的特征风味物质。癸醛和异戊酸乙酯在 FBFAP 组中的 OAV>1,且远大于其余 3 组,说明癸醛和异戊酸乙酯是 FBFAP 组的特征风味物质。短链脂肪酸在 4 组风干肠中相对含量均较高,但由于其嗅觉阈值高,对 4 组风干肠的风味贡献不大。

3 结论

利用电子鼻和电子舌分别对 4 组风干肠的挥发性化合物和滋味进行了分析。结果表明,4 组风干肠的风味和滋味均不同,且能将其明显区分开,相比较而言,微生物

表 5 4 组风干肠成品挥发性风味物质 OAV 值
Table 5 OAV value of volatile flavor substances in 4 groups of air-dried sausage products

化合物名称	嗅觉阈值/ ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	气味描述	OAV 值			
			CK	MNI	MNIP	FBFAP
乙醇	52 000	酒的气味和刺激性辛辣味	0.028 477	0.058 0745	0.039 657	0.032 731
异戊醇	300	苹果白兰地香气和辛辣味	0.475 278	0.246 539	0.314 971	0.415 832
苯乙醇	1 100	玫瑰香气	0.108 991	0.047 322	0.055 744	0.103 375
正己醇	500	淡青的嫩枝叶气息, 微带酒香、果香和脂肪气息	0.061 218	0.076 455	0.068 967	0.028 885
苯甲醇	20 000	稍有芳香气味	0.000 364	0.000 204	0.000 163	0.000 212
1-辛烯-3-醇	1	蘑菇	2.902 145	197.553 269	159.099 500	3.913 059
芳樟醇	6	有类似佛手(香柠檬)香味	/	8.051 414	/	/
1-戊醇	4 000	有杂醇油气味	/	0.026 325	0.017 512	/
正丁醇	500	有酒气味	/	0.010 410	0.006 766	/
苯甲醛	350	苦杏仁味, 燃烧时具有芳香气味	0.666 309	0.314 355	0.455 050	0.642 833
十四烷醛	300	油脂和鸛尾似桃子香气	0.138 852	/	/	0.236 474
反式-2-辛烯醛	3	柑橘类特别是橙色, 坚果特别是榛子的肥腻香气	5.027 315	48.002 755	46.181 003	0.806 650
正己醛	5	呈生的油脂和青草气及苹果香味	0.241 197	140.639 342	101.706 547	0.164 818
癸醛	0.10	脂蜡香, 香气青辛微甜, 甜橙油与柠檬油以及玫瑰样和蜡香的后韵	12.973 730	96.256 665	80.359 840	202.250 846
式-2,4-壬二烯醛	0.09	脂肪味, 蜡味, 清香味	/	154.547 038	146.253 739	/
正辛醛	0.7	脂蜡香, 果香茉莉气息, 甜橙样香, 脂肪蜜香	/	252.060 514	231.265 137	/
3-羟基-2-丁酮	8 000	呈奶油香气	0.071 952	0.172 386	0.202 272	0.130 812
辛酸乙酯	40	类似白兰地的香气, 并有甜味	19.485 549	18.921 938	15.481 891	13.820 142
正己酸乙酯	1	水果香气味	468.432 524	798.216 283	875.346 998	531.591 928
癸酸乙酯	5	椰子香味	86.412 527	/	76.178 605	80.856 098
丁酸乙酯	1	菠萝芳香气味	228.279 064	197.023 071	206.200 680	202.107 002
γ -丁内酯	20 000	焦糖, 甜味	0.004 630	0.002 334	0.002 152	0.004 736
庚酸乙酯	2.2	菠萝香气味	19.229 801	11.617 480	13.748 114	23.061 689
异戊酸乙酯	0.01	类似苹果、香蕉的香气和酸甜气味	1 675.603 336	1 118.800 385	1 876.817 946	4 387.497 362
正己酸	10 000	汗臭味	0.102 861	0.112 678	0.112 826	0.100 133
辛酸	3 000	略有不舒适的气味和焦膻味, 稀释后呈水果香气	0.174 018	0.182 141	0.172 150	0.153 717
丁酸	1 000	具有刺激性及难闻的气味	0.465 053	0.265 933	0.267 703	0.341 382
正癸酸	2 190	具有难闻的气味	0.030 029	0.032 941	0.040 049	0.034 601
异丁酸	50	具有强烈刺激性气味	0.880 002	0.498 157	0.518 236	0.924 731
壬酸	3 000	微有特殊气味	0.004 179	0.003 652	0.002 173	0.004 773
苯并噻唑	80	呈噻唑似气味	0.164 560	0.036 642	0.030 688	0.137 572

亚硝化抑制剂组和微生物亚硝化抑制剂与 PRO-MIX5 商业发酵剂协同组风味和滋味特征相似, 发酵牛骨调味基料和复配抗氧化剂与 PRO-MIX5 商业发酵剂协同组与空白对照组的气味和滋味特征相似。鲜味、咸味、苦味和涩味是 4 组风干肠中有效且重要的味觉指标, 加入微生物亚硝化抑制剂和微生物亚硝化抑制剂与 PRO-MIX5 商业

发酵剂协同能提高风干肠的鲜味, 降低咸味和苦味。谷氨酸、丙氨酸、牛磺酸和肌肽是 4 组风干肠中的主要游离氨基酸, 加入微生物亚硝化抑制剂与 PRO-MIX5 商业发酵剂协同能缩短风干肠的发酵时间, 促进风干肠鲜味氨基酸的生成和提高游离氨基酸总量; 谷氨酸和丙氨酸这两种呈鲜味和甜味的氨基酸对风干肠的滋味贡献最大,

4 组风干肠主要呈鲜甜味。4 组风干肠中共鉴定出 105 种挥发性风味物质,其中正己酸乙酯和异戊酸乙酯是微生物亚硝化抑制剂与 PRO-MIX5 商业发酵剂协同组的特征风味物质,芳樟醇是微生物亚硝化抑制剂组的特征风味物质,癸醛和异戊酸乙酯是发酵牛骨调味基料和复配抗氧化剂与 PRO-MIX5 商业发酵剂协同组的特征风味物质。单独添加微生物亚硝化抑制剂或微生物亚硝化抑制剂与 PRO-MIX5 商业发酵剂协同均能促进风干肠风味的形成。乳酸菌和微生物亚硝化抑制剂能促进风干肠中风味物质的形成,关于其产生醛类、酸类、醇类和酯类等风味物质的代谢途径和影响机制仍有待进一步研究。

参考文献

- [1] HU Y, CHEN Q, WEN R, et al. Quality characteristics and flavor profile of Harbin dry sausages inoculated with lactic acid bacteria and *Staphylococcus xylosum*[J]. LWT, 2019, 114: 108392.
- [2] CHEN J, HU Y, WEN R, et al. Effect of NaCl substitutes on the physical, microbial and sensory characteristics of Harbin dry sausage[J]. Meat Science, 2019, 156: 205-213.
- [3] FADDA S, LÓPEZ C, VIGNOLO G. Role of lactic acid bacteria during meat conditioning and fermentation: Peptides generated as sensorial and hygienic biomarkers[J]. Meat Science, 2010, 86(1): 66-79.
- [4] WEN R, SUN F, WANG Y, et al. Evaluation the potential of lactic acid bacteria isolates from traditional beef jerky as starter cultures and their effects on flavor formation during fermentation[J]. LWT, 2021, 142: 110982.
- [5] HU Y, LI Y, LI X, et al. Application of lactic acid bacteria for improving the quality of reduced-salt dry fermented sausage: Texture, color, and flavor profiles[J]. LWT, 2022, 154: 112723.
- [6] LU J, YANG Z, XU W, et al. Relationships between bacterial community and metabolites of sour meat at different temperature during the fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2019, 307: 108286.
- [7] HONGTHONG N, CHUMNGOEN W, TAN F J. Influence of sucrose level and inoculation of *Lactobacillus plantarum* on the physicochemical, textural, microbiological, and sensory characteristics of Isan sausage (Thai fermented pork sausage) [J]. Animal Science Journal, 2020, 91(1): e13312.
- [8] BAO R, LIU S, JI C, et al. Shortening fermentation period and quality improvement of fermented fish, Chouguayu, by co-inoculation of *Lactococcus lactis* M10 and *Weissella cibaria* M3[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 3 003.
- [9] ZHONG A, CHEN W, DUAN Y, et al. The potential correlation between microbial communities and flavors in traditional fermented sour meat[J]. LWT, 2021, 149: 111873.
- [10] GAN X, LI H, WANG Z, et al. Does protein oxidation affect proteolysis in low sodium Chinese traditional bacon processing? [J]. Meat Science, 2019, 150: 14-22.
- [11] CHEN Q, KONG B, SUN Q, et al. Antioxidant potential of a unique LAB culture isolated from Harbin dry sausage: In vitro and in a sausage model[J]. Meat Science, 2015, 110: 180-188.
- [12] CHEN Q, KONG B, HAN Q, et al. The role of bacterial fermentation in lipolysis and lipid oxidation in Harbin dry sausages and its flavour development[J]. LWT, 2017, 77: 389-396.
- [13] LI R Y, ZHENG X W, ZHENG X, et al. Characterization of bacteria and yeasts isolated from traditional fermentation starter (Fen-Daqu) through a ¹H-NMR-based metabolomics approach[J]. Food Microbiology, 2018, 76: 11-20.
- [14] 李秀明, 刘静静, 闫利娟, 等. 乳酸菌抑制 N-亚硝胺形成的机理探究及应用效果[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 141-147.
LI Xiu-ming, LIU Jing-jing, YAN Li-juan, et al. Inhibition mechanism and application of lactic acid bacteria on N-nitrosamine formation[J]. Food Science, 2020, 41(2): 141-147.
- [15] 樊晓盼, 施煜, 刘一鸣, 等. 天然牛肉调味基料的增稠工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(14): 81-85.
FAN Xiao-pan, SHI Yu, LIU Yi-ming, et al. Optimization of thickening process for natural beef flavor[J]. Food Research and Development, 2019, 40(14): 81-85.
- [16] 熊凤娇, 马俪珍, 王洋. 二次回归正交设计优选阻断 NDMA 形成的亚硝化抑制剂[J]. 肉类研究, 2018, 32(6): 29-34.
XIONG Feng-jiao, MA Li-zhen, WANG Yang. Optimization of nitrosation inhibitors for blocking N-nitrosodimethylamine formation based on quadratic regression orthogonal design [J]. Meat Research, 2018, 32(6): 29-34.
- [17] 李秀明, 常娅妮, 吴晨燕, 等. 微生物亚硝化抑制剂对红肠品质的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(2): 13-18.
LI Xiu-ming, CHANG Ya-ni, WU Chen-yan, et al. Effects of microbial nitrification inhibitors on the quality of red sausage[J]. Meat Research, 2019, 33(2): 13-18.
- [18] 牛树彬, 田婧, 周慧敏, 等. 风干肠加工和贮藏过程中蛋白质的降解规律[J]. 肉类研究, 2020, 34(4): 1-7.
NIU Shu-bin, TIAN Jing, ZHOU Hui-min, et al. Pattern of proteolysis in air-dried sausages during processing and storage[J]. Meat Research, 2020, 34(4): 1-7.
- [19] 陈媛媛, 于德阳, 秦建鹏, 等. 外源抑制物对风干肠风味变化的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 215-225, 231.
CHEN Yuan-yuan, YU De-yang, QIN Jian-peng, et al. Effects of exogenous inhibitors on the microbial community composition and flavor changes of air-dried sausage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 215-225, 231.
- [20] 雷虹. 传统风干肉在风干和贮藏过程中品质及风味物质的变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018: 14-15.
LEI Hong. Study on the quality and flavor compounds of traditional dried meat during drying and storage[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018: 14-15.
- [21] 张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 不同复热方式对猪耳朵制品挥发性风味和脂肪氧化的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 242-248.

- ZHANG Kai-hua, ZANG Ming-wu, ZHANG Zhe-qi, et al. Effect of reheating methods on volatile flavor constituents and lipid oxidation in cooked pig ear[J]. Food Science, 2018, 39(14): 242-248.
- [22] BOU R, COFRADES S, JIMÉNEZ-COLMENERO F. Fermented meat sausages[M]. Fermented Foods in Health and Disease Prevention. England: Academic Press, 2017: 203-235.
- [23] PÉREZ-SANTAESCOLÁSTICA C, CARBALLO J, FULLADOSA E, et al. Effect of proteolysis index level on instrumental adhesiveness, free amino acids content and volatile compounds profile of dry-cured ham[J]. Food Research International, 2018, 107: 559-566.
- [24] HU Y, LI Y, ZHU J, et al. Improving the taste profile of reduced-salt dry sausage by inoculating different lactic acid bacteria[J]. Food Research International, 2021, 145: 110391.
- [25] FLORES M. Understanding the implications of current health trends on the aroma of wet and dry cured meat products[J]. Meat Science, 2018, 144: 53-61.
- [26] WEN R, HU Y, ZHANG L, et al. Effect of NaCl substitutes on lipid and protein oxidation and flavor development of Harbin dry sausage[J]. Meat Science, 2019, 156: 33-43.
- [27] SIDIRA M, KANDYLIS P, KANELAKI M, et al. Effect of immobilized *Lactobacillus casei* on volatile compounds of heat treated probiotic dry-fermented sausages[J]. Food Chemistry, 2015, 178: 201-207.
- [28] LIN M, PAN D, GUO T, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* with antioxidant properties on the flavour and oxidation of Chinese sausages[J]. LWT, 2022, 162: 113427.
- [29] BOMFIM V B, NETO J H P L, LEITE K S, et al. Partial characterization and antioxidant activity of exopolysaccharides produced by *Lactobacillus plantarum* CNPC003[J]. LWT, 2020, 127: 109349.
- [30] LI S, HUANG R, SHAH N P, et al. Antioxidant and antibacterial activities of exopolysaccharides from *Bifidobacterium bifidum* WBIN03 and *Lactobacillus plantarum* R315[J]. Journal of Dairy Science, 2014, 97(12): 7 334-7 343.
- [31] ZHANG L, LIU C, LI D, et al. Antioxidant activity of an exopolysaccharide isolated from *Lactobacillus plantarum* C88[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 54: 270-275.
- [32] NEHAL F, SAHNOUN M, SMAOUI S, et al. Characterization, high production and antimicrobial activity of exopolysaccharides from *Lactococcus lactis* F-mou[J]. Microbial Pathogenesis, 2019, 132: 10-19.
- [33] OLIVARES A, NAVARRO J L, FLORES M. Characterization of volatile compounds responsible for the aroma in naturally fermented sausages by gas chromatography-olfactometry[J]. Food Science and Technology International, 2015, 21(2): 110-123.
- [34] SIDIRA M, KANDYLIS P, KANELAKI M, et al. Effect of immobilized *Lactobacillus casei* on the evolution of flavor compounds in probiotic dry-fermented sausages during ripening[J]. Meat Science, 2015, 100: 41-51.
- [35] GAENZLE M G. Lactic metabolism revisited: metabolism of lactic acid bacteria in food fermentations and food spoilage[J]. Current Opinion in Food Science, 2015(2): 106-117.
- [36] CAMPANIELLO D, SPERANZA B, BEVILACQUA A, et al. Industrial validation of a promising functional strain of *Lactobacillus plantarum* to improve the quality of Italian sausages[J]. Microorganisms, 2020, 8(1): 116.
- [37] LAPSONGPHON N, YONGSAWATDIGUI J, CADWALLADER K R. Identification and characterization of the aroma-impact components of Thai fish sauce [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(10): 2 628-2 638.
- [38] DZIALO M C, PARK R, STEENSELS J, et al. Physiology, ecology and industrial applications of aroma formation in yeast[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2017, 41(S1): S95-S128.

(上接第 24 页)

- [6] 许丽佳, 陈铭, 王玉超, 等. 高光谱成像的猕猴桃糖度无损检测方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2 188-2 195.
- XU Li-jia, CHEN Ming, WANG Yu-chao, et al. Nondestructive testing method for sugar content of kiwifruit by hyperspectral imaging[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(7): 2 188-2 195.
- [7] 余志远. 哈密瓜糖度近红外光谱检测方法研究及便携式装置设计[D]. 石河子: 石河子大学, 2021: 20-32.
- YU Zhi-yuan. Study on near infrared spectroscopy detection method of sugar degree of Hami melon and design of portable device[D]. Shihezi: Shihezi University, 2021: 20-32.
- [8] 刘燕德, 张雨, 姜小刚, 等. 不同贮藏期水蜜桃硬度及糖度的检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(1): 243-249.
- LIU Yan-de, ZHANG Yu, JIANG Xiao-gang, et al. Study on the determination of hardness and sugar content of honey peach in different storage periods[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(1): 243-249.
- [9] 介邓飞, 杨杰, 彭雅欣, 等. 基于高光谱技术的柑橘不同部位糖度预测模型研究[J]. 食品与机械, 2017, 33(3): 51-54.
- JIE Deng-fei, YANG Jie, PENG Ya-xin, et al. Study on sugar content prediction model of different parts of citrus based on hyperspectral technology[J]. Food & Machinery, 2017, 33(3): 51-54.
- [10] 高升, 王巧华. 基于可见/近红外透射光谱技术的红提糖度和含水率无损检测[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 566-577.
- GAO Sheng, WANG Qiao-hua. Nondestructive detection of sugar content and moisture content of red extraction based on visible/near infrared transmission spectroscopy[J]. China Optics, 2021, 14(3): 566-577.
- [11] 司守奎, 孙兆亮. 数学建模算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 311.
- SI Shou-kui, SUN Zhao-liang. Mathematical modeling algorithm and application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 311.